

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПУЛЬПЫ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФЛОТАЦИИ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ КОНТРОЛЕ ПАРАМЕТРОВ

¹К. Акишев[✉], ²А. Подвалов[✉], ¹А. Зейнуллин[✉], ¹Е. Айбульдинов[✉], ²А. Нурмаганбетов[✉],
¹М. Оспанова[✉], ²М. Чагай[✉], ²М. Айтиева[✉], ²С. Хусаинова[✉], ³Н. Токтар[✉]

¹Казахский университет технологии и бизнеса им.К.Кулажсанова, Астана, Казахстан,

²ТОО AG Tech, Астана, Казахстан,

³Торайгыров университет, Павлодар, Казахстан

✉ Корреспондент-автор: akmail04cx@mail.ru, elaman_@mail.ru

Актуальность исследования заключается в необходимости повышения устойчивости и селективности обогащения руды в условиях изменяющегося химического состава пульпы и требованиями по автоматизации управлением технологическими процессами. Целью работы являлась оценка влияния параметров химии пульпы на эффективность флотации, обоснования использования аналитических и интеллектуальных методов для адаптивного управления процессом.

В исследовании использованы методы онлайн-контроля рН, окислительно-восстановительного потенциала (Eh) с применением электрохимических датчиков, лабораторные анализы ионного состава жидкой фазы, аналитические и предиктивные методы обработки данных. Проведён анализ взаимосвязи между химическими параметрами пульпы и технологическими показателями флотации.

Установлено, ключевым интегральным параметром является окислительно-восстановительного потенциал Eh. Определён оптимальный диапазон Eh (–50...+150 мВ), при котором достигаются максимальные значения извлечения меди, выход за пределы данного диапазона приводит к снижению извлечения на 5–12%. Показано влияние рН (8,6–9,2) и концентраций ионов Ca^{2+} и SO_4^{2-} на селективность флотации, устойчивость пенного слоя. Качественно подтверждена возможность прогнозирования снижения извлечения меди с на основе анализа динамики Eh и контроля времени.

Практическая значимость работы заключается в обосновании интеграции онлайн-контроля химии пульпы и предиктивных алгоритмов в контуры АСУ-ТП флотации для повышения надёжности, эффективности процесса. Дальнейшие исследования направлены на развитие soft-сенсоров, масштабирование предложенных решений для промышленных условий.

Ключевые слова: флотация, химия пульпы, окислительно-восстановительный потенциал, извлечение, онлайн-контроль, автоматизация, интеллектуальные методы

ПАРАМЕТРЛЕРДІ АВТОМАТТАНДЫРЫЛҒАН БАҚЫЛАУ КЕЗІНДЕ ЦЕЛЛЮЛОЗА ХИМИЯСЫНЫҢ ФЛОТАЦИЯ ТИІМДІЛІГІНЕ ӘСЕРІ

¹К. Акишев[✉], ²А. Подвалов[✉], ²А. Зейнуллин[✉], ¹Е. Айбульдинов[✉], ²А. Нұрмағанбетов[✉], ¹М. Оспанова,
²М. Чагай[✉], ²М. Айтиева[✉], ²С. Хусаинова[✉], ³Н. Токтар[✉]

¹Қ.Құлажсанова ат. Қазақ технология және бизнес университеті, Астана, Қазақстан,

²AG Tech ЖШС, Астана, Қазақстан,

³Торайгыров университеті, Павлодар, Қазақстан,
e-mail: akmail04cx@mail.ru, elaman_@mail.ru

Зерттеудің өзектілігі целлюлозаның өзгеретін химиялық құрамы жағдайында кенді байытудың тұрақтылығы мен селективтілігін арттыру және технологиялық процестерді басқаруды автоматтандыру талаптары болып табылады. Жұмыстың мақсаты химиясы параметрлерінің флотация тиімділігіне әсерін бағалау, процесті адаптивті басқару үшін аналитикалық және интеллектуалды әдістерді қолдану негіздемесі болды.

Зерттеуде электрохимиялық датчиктерді қолдана отырып, рН, тотығу-тотықсыздану потенциалын (Еh) онлайн бақылау әдістері, сұйық фазаның иондық құрамын зертханалық талдау, деректерді өңдеудің аналитикалық және болжамды әдістері қолданылды. Химиялық параметрлері мен флотацияның технологиялық көрсеткіштері арасындағы байланысты талдау жүргізілді.

Негізгі интегралдық параметр Еh тотығу-тотықсыздану потенциалы болып табылады. Оңтайлы еh диапазоны анықталды (-50...+150 мВ), онда мыс алудың максималды мәндеріне қол жеткізіледі, осы диапазоннан тыс шығу экстракцияның 5–12% төмендеуіне әкеледі. рН (8,6–9,2) және Ca^{2+} концент және SO_4^{2-} иондарының концентрациясының флотация селективтілігіне, көбік қабатының тұрақтылығына әсері көрсетілген. Еh динамикасын талдау және уақытты бақылау негізінде мыс с өндірісінің төмендеуін болжау мүмкіндігі сапалы түрде расталды.

Жұмыстың практикалық маңыздылығы процестің сенімділігі мен тиімділігін арттыру үшін целлюлоза химиясы мен болжамды алгоритмдердің АБЖ-ТП флотация контурына онлайн-бақылауды біріктіруді негіздеу болып табылады. Әрі қарайғы зерттеулер soft сенсорларын дамытуға, өнеркәсіптік жағдайлар үшін ұсынылған шешімдерді масштабтауға бағытталған.

Түйін сөздер: флотация, целлюлоза химиясы, тотығу-тотықсыздану потенциалы, экстракция, онлайн бақылау, автоматтандыру, интеллектуалды әдістер

THE EFFECT OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF THE PULP ON THE EFFICIENCY OF FLOTATION DURING AUTOMATED PARAMETER CONTROL

¹K. Akishev[✉], ²A. Podvalov, ¹A. Zeynullin, ¹Y. Aibuldinov[✉], ²A. Nurmaganbetov, ¹M. Ospanova, ²M. Chagay, ²M. Aitiyeva, ²S. Khussainova ³N. Toktar

¹K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan,

²AG Tech LLP, Astana, Kazakhstan,

³Toraigyrov University, Pavlodar, Kazakhstan,
e-mail: akmail04cx@mail.ru, elaman_@mail.ru

The relevance of the research lies in the need to increase the stability and selectivity of ore processing in conditions of changing chemical composition of the pulp and the requirements for automation by process control. The aim of the work was to evaluate the influence of the parameters of the pulp chemistry on the efficiency of flotation, to justify the use of analytical and intelligent methods for adaptive process control.

The study uses methods of online monitoring of pH, redox potential (Eh) using electrochemical sensors, laboratory analyses of the ionic composition of the liquid phase, analytical and predictive data processing methods. The analysis of the relationship between the chemical parameters of the pulp and the technological parameters of flotation is carried out.

It has been established that the key integral parameter is the redox potential Eh. The optimal Eh range (-50...+150 mV) has been determined, at which the maximum copper recovery values are achieved, going beyond this range leads to a reduction in recovery by 5-12%. The effect of pH (8.6–9.2) and concentrations of Ca^{2+} and SO_4^{2-} ions on the selectivity of flotation and the stability of the foam layer is shown. The possibility of predicting a decrease in copper recovery based on the analysis of Eh dynamics and time control has been qualitatively confirmed.

The practical significance of the work is to substantiate the integration of online monitoring of pulp chemistry and predictive algorithms into the contours of automated control systems for flotation to increase the reliability and efficiency of the process. Further research is aimed at developing soft sensors and scaling the proposed solutions for industrial environments.

Keywords: flotation, pulp chemistry, redox potential, extraction, online control, automation, intelligent methods

Введение. Флотационное обогащение является одним из ключевых процессов переработки сульфидных и окисленных руд цветных металлов и определяет до 70–80 % суммарного извлечения меди на обогатительных фабриках. Эффективность флотации в значительной степени обусловлена химическим составом пульпы, включающим концентрации ионов металлов, pH, окислительно-восстановительный потенциал (Eh), содержание растворённых солей, дисперсность твёрдой фазы и активность реагентов. Изменение указанных параметров приводит к трансформации поверхностных свойств минералов, кинетики адсорбции реагентов и устойчивости пенного слоя.

Для медных месторождений Казахстана, в частности Нурказганского, характерна высокая изменчивость минералогического и химического состава руды, что обуславливает нестационарность флотационного процесса. В условиях традиционного управления, основанного на локальных ПИД-регуляторах и периодическом лабораторном анализе, это приводит к перерасходу реагентов, снижению извлечения и росту потерь металла в хвостах. Проведённое предпроектное обследование Нурказганской обогатительной фабрики показало значительное число аварийных остановок и колебаний технологических показателей, напрямую связанных с несвоевременным учётом изменений состава пульпы [1].

В последние годы в мировой практике наблюдается переход к автоматизированному и интеллектуальному управлению флотацией, основанному на онлайн-контроле химических и физико-химических параметров пульпы с применением искусственного интеллекта, машинного обучения и мультисенсорных измерительных систем. Однако для условий Казахстана подобные решения остаются недостаточно адаптированными к реальным производственным ограничениям и вариативности рудного сырья. Это определяет актуальность настоящего исследования.

Актуальность работы обусловлена совокупностью технологических, экономических и экологических факторов:

- повышением требований к извлечению металлов при одновременном снижении содержания меди в исходной руде требует более точного управления реагентным режимом и состоянием пульпы;

- высокой изменчивостью химического состава пульпы (Cu^{2+} , Fe^{3+}/Fe^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , pH, Eh) приводит к нестабильности флотации при использовании традиционных методов регулирования;

- ограниченность лабораторного контроля не позволяет оперативно реагировать на изменения состава пульпы, особенно в многокамерных флотационных каскадах;

- развитием цифровизации и Индустрии 4.0 в горнометаллургическом комплексе Республики Казахстан требует внедрения программно-аппаратных комплексов (ПАК), обеспечивающих онлайн-анализ и интеллектуальное управление процессами обогащения;

- внедрение автоматизированного контроля химического состава пульпы и интеллектуальных алгоритмов управления позволяет снизить потери меди в хвостах, сократить расход реагентов и повысить устойчивость процесса флотации [1].

В исследованиях связанных с оценкой влияния химического состава пульпы на эффективность флотации, возможностям автоматизированного управления данным процессом, особое внимание уделяется роли pH, окислительно-восстановительного потенциала Eh, ионного состава и растворённых солей, а также использованию интеллектуальных методов мониторинга и управления.

Анализ зарубежных и отечественных исследований позволяет выявить основные тенденции развития автоматизации флотационных процессов, определить существующие ограничения, обосновать необходимость дальнейших исследований.

Современные тренды исследований по тематике настоящего исследования представлены широким спектром публикаций.

В работе [2] предложена динамическая мо-

дель флотации, учитывающая физику пенного слоя и гидродинамику процесса. Показано, что устойчивость флотации и точность предиктивного управления существенно зависят от параметров среды, включая химическое состояние пульпы. Разработанная модель заложила основу для дальнейших исследований в области интеллектуального управления флотационными процессами.

В исследовании [3] описано влияние качества воды и специфических ионов на флотационную активность. Принято, что ионы Ca^{2+} , Mg^{2+} и SO_4^{2-} оказывают значительное влияние на устойчивость пены и эффективность извлечения, особенно при замкнутых водооборотных схемах. Исследования подчёркивают необходимость учёта ионного состава пульпы при автоматизированном управлении флотацией.

В публикации [4] представлена работа окислительно-восстановительного потенциала (Eh) в селективной флотации медных сульфидов и молибденита. Получено, что отклонение Eh от оптимального диапазона приводит к снижению извлечения вследствие изменения поверхностных свойств минералов. Такие же результаты описаны в работе [5], где Eh рассматривается как управляемый технологический параметр.

Работа [6] предоставляет данные, анализа влияния ионной силы среды на адсорбцию реагентов и кинетику флотации. Отмечено, что изменение ионной силы без корректировки режима управления может привести к нестабильности технологических показателей.

Исследования [7] анализируют механизмы влияния металлических ионов на флотацию медных, свинцовых и цинковых руд. Принято, что ионный состав пульпы формирует сложные конкурентные процессы адсорбции, что требует комплексного мониторинга химических параметров в режиме реального времени.

В статье [8] подготовлен анализ флотации халькопирит-пиритных руд, где подчёркнута взаимосвязь между химией пульпы, Eh, pH и селективностью процесса. Указана ограниченность традиционных эмпирических подходов

и необходимость внедрения интеллектуальных систем управления.

Исследование [9] выполнено в условиях промышленного объекта демонстрирует, что смена источников технологической воды без корректного контроля химического состава пульпы приводит к снижению извлечения меди. Это подтверждает практическую значимость онлайн-контроля химических параметров.

В работе [10] описана эффективность нелинейного модельно-предиктивного управления (NMPC) для флотационных схем. Подчеркнуто, что качество управления напрямую зависит от достоверности входных параметров, включая химические характеристики пульпы.

Публикация [11] рассматривает флотацию медьсодержащего техногенного сырья и демонстрирует, что изменение химического состава среды требует адаптивного реагентного и технологического управления, особенно при нестабильном составе исходного материала.

В работе [12] исследовали влияние различных ионов, содержащихся в технической воде для медно-никелево-марганцевой руды. В результате исследования двухфазной пены были получены наблюдения, которые подтвердили результаты трехфазного исследования. Результаты показали, что двухвалентные неорганические электролиты - Ca^{2+} , Mg^{2+} и SO_4^{2-} - в большей степени способствуют образованию пены, чем одновалентные неорганические электролиты - Cl^- , NO_3^- и Na^+ .

Анализ научных публикаций по теме исследования показывает, что химический состав пульпы, а именно ионный состав, pH, окислительно-восстановительный потенциал (Eh)-это ключевой фактор, определяющий эффективность и устойчивость флотационного процесса. Исследования подтверждают потенциал интеллектуальных и предиктивных методов управления, но существует недостаточная интеграция онлайн-контроля химии пульпы с системами автоматического управления, что обосновывает необходимость исследований, направленных на разработку программно-аппаратных комплексных ре-

шений, обеспечивающих адаптивное управление флотацией в условиях изменчивого состава руды.

Целью исследования является установление закономерностей влияния химического состава пульпы, окислительно-восстановительного потенциала (Eh), pH, ионного состава, на эффективность флотационного обогащения медных руд и обоснование целесообразности применения автоматизированного контроля и интеллектуальной аналитики для повышения эффективности флотационного процесса в промышленных условиях.

Для достижения поставленной цели поставлены и решены следующие задачи:

- анализ химического состава пульпы, формируемой на этапах флотационного обогащения, с выделением ключевых параметров (pH, Eh, концентрации ионов металлов и растворённых солей), оказывающих наибольшее влияние на извлечение меди;
- исследование влияние изменения окислительно-восстановительного потенциала (Eh) на селективность флотации и устойчивость процесса в условиях переменного состава исходного сы-

рья;

- оценка взаимосвязи между параметрами химии пульпы и технологическими показателями флотации (извлечение, качество концентрата, стабильность пенного слоя);

- анализ возможности автоматизированного контроля параметров пульпы;

- обоснование применения аналитических и интеллектуальных методов обработки данных для формирования рекомендаций по адаптивному управлению флотацией при изменяющихся условиях химического состава пульпы;

- определение направлений дальнейших исследований, связанных с интеграцией онлайн-контроля химии пульпы, предиктивных алгоритмов регулирования технологических параметров.

Материалы и методы. Лабораторные и опытно-технологические исследования проводились на базе производственных и испытательных площадок, в условиях обогатительной фабрики месторождения Нурказган (Республика Казахстан) - для анализа технологических параметров флотационного процесса и отбора проб пульпы на различных стадиях флотации;



Рис.1 - Производственно-контрольная лаборатория

- в производственно-контрольной лаборатории (ПКЛ), выполнявшей химический и физико-химический анализ пульпы рис.1;

- в рамках опытно-технологических испытаний с применением средств автоматизированного контроля параметров пульпы.

Объектом исследования являлся процесс флотационного обогащения медной руды месторождения Нурказган.

В качестве исследуемого материала использовалась рудная пульпа, сформированная на стадиях измельчения и флотации рис.2.

Материалы исследования:

- пробы пульпы, для стадий флотационного процесса;

- лабораторные данные анализов химического

состава пульпы;

- данные по результатам опытно-технологических испытаний;

- параметры эффективности флотации (извлечение меди, выход, качество концентрата, устойчивость пенного слоя).

Исследование выполнялось с использованием комплекса экспериментальных и аналитических методов.

При оценке химического состояния пульпы определялся:

- водородный показатель (pH);

- окислительно-восстановительный потенциал (Eh);

- качественные и количественные характеристики ионного состава.



Рис.2 - Процесс измельчения рудной пульпы в шаровой мельнице

Измерения pH и Eh выполнялись с применением электрохимических датчиков, установленных непосредственно в пульпу — это позволяло регистрировать параметры в оперативном режиме рис.3.

Эффективность флотационного процесса оце-

нивалась по стандартным технологическим показателям: извлечению меди в концентрат, выходу концентрата и устойчивости пенного слоя.

Расчёт показателей выполнялся на основе экспериментальных данных по существующим методикам обогащения полезных ископаемых.



Рис.3 - Установка электрохимических датчиков в пульпу

Методы статистического и корреляционного анализа использовались для выявления закономерностей влияния химического состава пульпы на показатели флотации. В ходе экспериментов, определялись возможности автоматизированного контроля параметров пульпы.

Результаты исследования отражают условия переработки сырья месторождения Нурказган и требуют дополнительных исследований при применении на других обогатительных фабриках с иным минералогическим и химическим составом руды.

Обсуждение и результаты. Анализ химического состава пульпы на стадиях флотационного обогащения.

Химический состав пульпы на стадиях измельчения и флотационного обогащения - это продукт воздействия минералогического состава руды, качества оборотной воды, реагентного режима, гидродинамических условий процесса.

В рамках настоящего исследования установлено, решающее влияние на извлечение меди оказывают следующие параметры:

- pH;
- окислительно-восстановительный потенциал (Eh);

- концентрации ионов кальция, магния, железа, сульфат-ионов, формирующих ионную среду пульпы.

При этом на стадии измельчения осуществляется интенсификация минеральных фаз, в котором происходит рост удельной поверхности твердой фазы с активным переходом ионов в жидкую фазу.

Получена химически активная пульпа с ярко выраженной изменчивостью pH и Eh. В стадиях основной и контрольной флотации параметры пульпы стабилизируются, но остаются чувствительными к колебаниям состава исходного сырья.

Установлено, что значение pH пульпы на всех стадиях флотации находится в слабощелочной области, оптимальной для флотации медных сульфидов. При этом pH оказывает комплексное влияние на:

- заряд поверхности минералов;
- степень диссоциации реагентов;
- устойчивость пенного слоя.

(Eh)-окислительно-восстановительный потенциал, является наиболее чувствительным параметром, показывает электрохимическое состо-

яние среды, определяет степень окисления поверхности минералов и напрямую связанным с селективностью флотации.

В табл.1 приведены диапазоны рН и Еh пульпы по стадиям флотационного процесса.

Таблица 1 - Диапазоны рН и Еh пульпы по стадиям флотационного процесса

Стадия процесса	рН	Еh, мВ	Характеристика среды
После измельчения	8.2–8.8	–150...+50	Активная, нестабильная
Основная флотация	8.6–9.2	–50...+150	Оптимальная
Контрольная флотация	8.8–9.4	0...+250	Слабоокислительная

Представленный на рис.4 график отражает изменение водородного показателя рН пульпы при переходе от стадии измельчения к стадиям основной, контрольной флотации.

Видно, что происходит постепенная стабилизация и незначительный рост рН в ходе флотационного процесса.

На стадии измельчения рН характеризуется широким диапазоном значений-это обусловлено прежде всего, интенсивным раскрытием минеральных фаз, активацией свежих поверхностей, взаимодействием твёрдой фазы с оборотной водой.

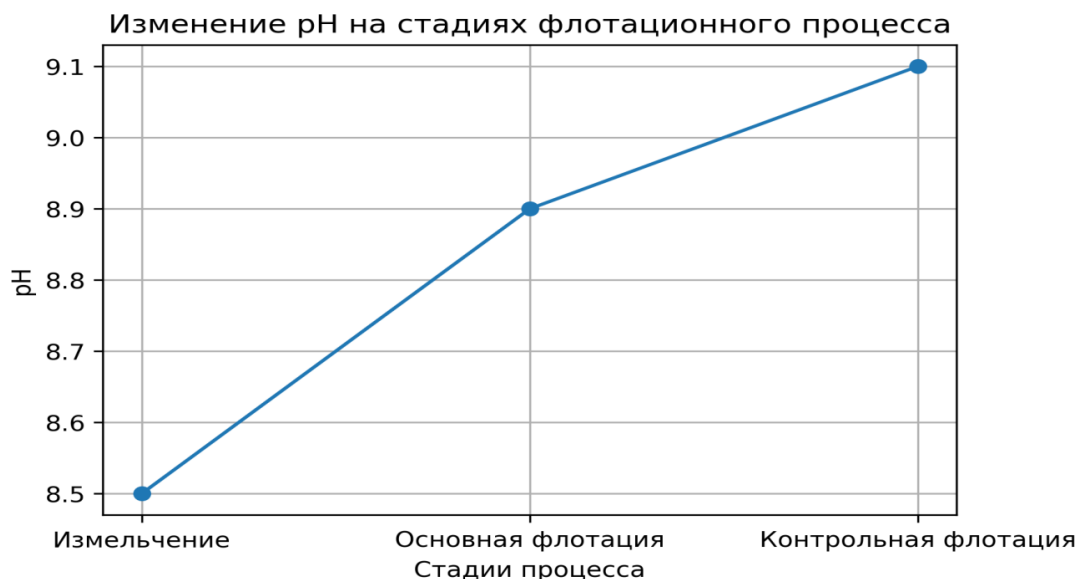


Рис.4 - Изменение рН пульпы по стадиям флотационного процесса

Из рис.4 видно, что в процессе основной флотации рН стабилизируется за счёт дозирования реагентов, формирования квазистационарного химического равновесия в пульпе. В то же время на стадии контрольной флотации наблюдается дальнейший сдвиг рН в слабощелочную область, обеспечивающей поддержание устойчивости пенного слоя, снижению вторичного за-

хвата пустой породы.

Эти результаты подтверждают, что рН является параметром управления флотацией, который влияет на кинетику реагентных реакций и стабильность процесса.

Анализ жидкой фазы пульпы показывает значительное присутствие ионов Ca^{2+} , Mg^{2+} ,

Fe^{3+}/Fe^{2+} , а также SO_4^{2-} за счет оборотной воды и переработки техногенно-изменённого сырья.

В этом случае ионы Са и Мп оказывают негативное действие на медные минералы, снижающее активность коллекторов, ухудшая извлечение меди. Увеличение концентрации сульфат-ионов способствуют росту ионной силы раствора и дестабилизации пенного слоя.

На рис.5 представлен график изменения окислительно-восстановительного потенциала (Eh), демонстрирующий динамику электрохимического состояния пульпы на различных стадиях флотационного обогащения.

Стадии измельчения пульпы характеризуется восстановительной средой-это связано с образованием новых поверхностей сульфидных мине-

ралов, присутствием восстановительных компонентов.

Переход к основной флотации обусловлен ростом Eh до значений оптимального диапазона селективной флотации медных минералов. Диапазон обеспечивает благоприятные условия для адсорбции коллекторов, формирования устойчивых гидрофобных частиц. Стадия контрольной флотации Eh смещена в сторону окислительных значений-это приводит к частичному снижению селективности, но способствует доизвлечению меди из труднообогатимых фракций.

Представленный на рис.5 график показывает Eh- интегральным и высокочувствительным параметром, влияющим на извлечение меди и требующим приоритетного контроля в автоматизированных системах управления.

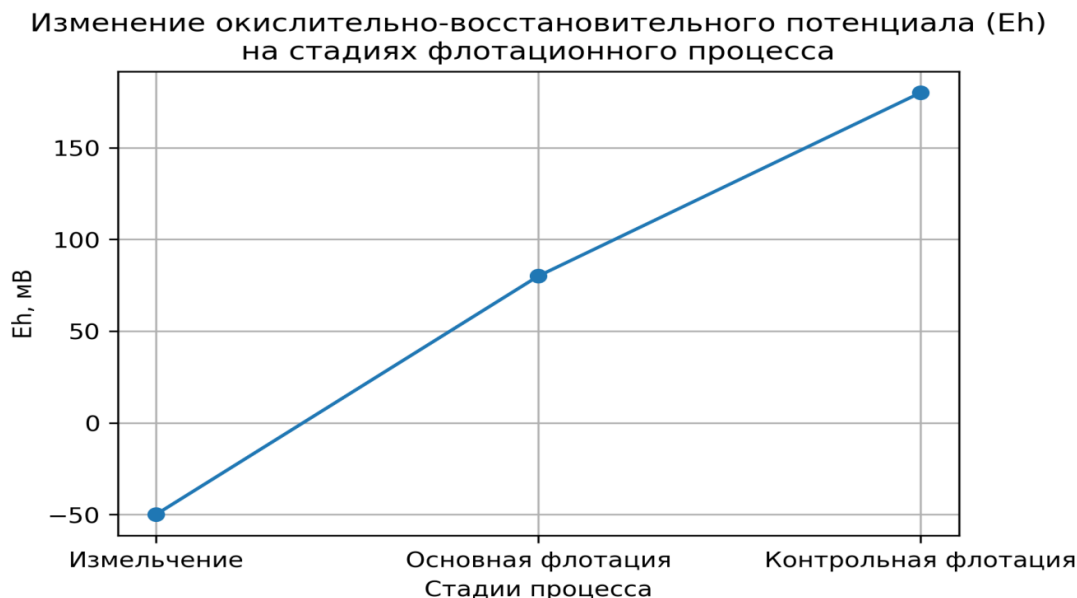


Рис.5 - Изменение окислительно-восстановительного потенциала (Eh) по стадиям процесса

В табл.2 представлены Обобщённые концентрации основных ионов в пульпе

График рис.6 распределения концентраций основных ионов в жидкой фазе пульпы отражает влияние кальциевых и сульфатных ионов на ионную среду флотационного процесса. Высокое содержание Ca^{2+} и SO_4^{2-} обусловлено прежде всего минералогическим составом перерабатываемого сырья, использованием обо-

ротной воды с накоплением растворённых солей. При этом ионы Са оказывают выраженное негативное действие на медные сульфиды, понижая эффективность адсорбции коллекторов, ухудшая селективность флотации. Сульфат-ионы увеличивают ионную силу раствора, что негативно сказывается на устойчивости пенного слоя, приводит к росту механического захвата пустой породы. Низкие концентрации ионов Fe,

несмотря на не высокую концентрацию, играют значимую роль в формировании окислительно-восстановительного потенциала среды. Представленный на рис.6 график обуславливает необ-

ходимость комплексного контроля ионного состава пульпы при разработке адаптивных стратегий управления флотацией.

Таблица 2 - Обобщённые концентрации основных ионов в пульпе

Ион	Диапазон концентраций, мг/л	Влияние на флотацию
Ca^{2+}	250–480	Снижение селективности
Mg^{2+}	80–150	Ухудшение пенообразования
$\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$	5–25	Изменение Eh
SO_4^{2-}	900–1500	Рост ионной силы

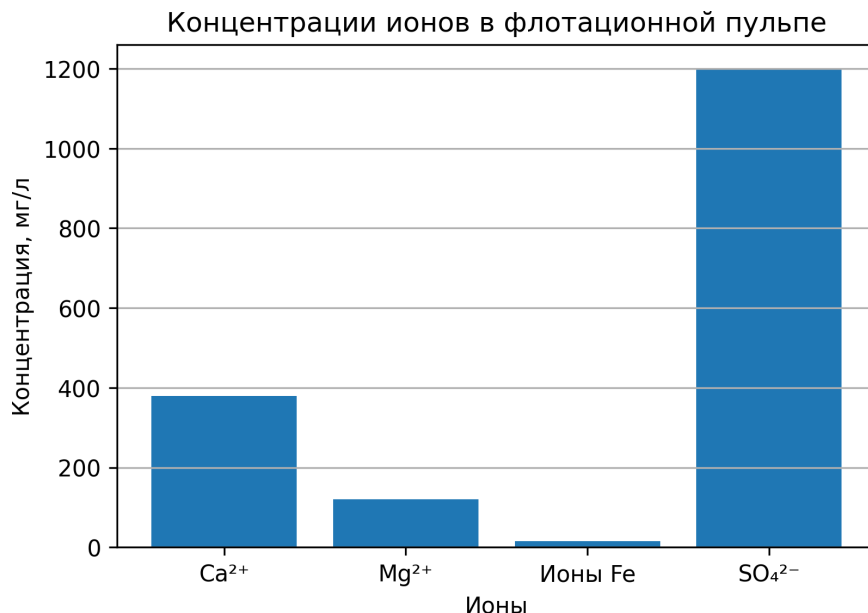


Рис.6 - Концентрации основных ионов в жидкой фазе пульпы

Сопоставление химических параметров пульпы с показателями флотации показало, что максимальное извлечение меди может достигаться при сбалансированном сочетании pH и Eh, умеренных концентрациях растворённых солей. При превышении пороговых значений ионного состава наблюдается увеличение потерь меди в хвостах табл.3.

График рис.7 степени влияния параметров химического состава пульпы на извлечение меди показал относительную значимость отдельных факторов.

Основное влияние на извлечение меди оказывают окислительно-восстановительный потенциал (Eh) и концентрация ионов кальция - это подтверждает электрохимическую природу процессов флотации медных сульфидов.

Показатель pH оказывает умеренное влияние, являясь регулирующим фактором для реагентных реакций, устойчивости пены, но он не определяет селективность процесса. Влияние сульфат-ионов можно оценить, как среднее, но с существенным усилением за счёт роста ионной силы среды.

Таблица 3 - Характер влияния параметров химии пульпы на извлечение меди

Параметр	Характер влияния	Степень значимости
pH	Косвенное	Средняя
Eh	Прямое	Высокая
Ca ²⁺	Отрицательное	Высокая
SO ₄ ²⁻	Отрицательное	Средняя

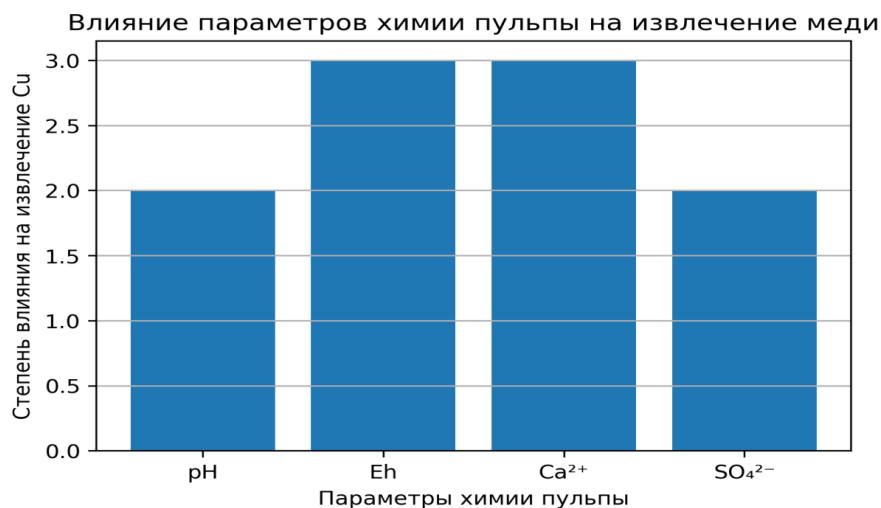


Рис.7 - Влияние параметров химического состава пульпы на извлечение меди

Полученные результаты свидетельствуют, что эффективное управление флотацией требует приоритетного контроля именно показателя Eh и ионного состава пульпы, а не только технологических параметров, что способствует необходимости внедрения интеллектуальных систем анализа и регулирования.

Определено, что химический состав пульпы является ключевым фактором эффективности флотационного обогащения меди. Традиционный подход, основанный на реагентном режиме, без контроля pH, Eh, ионного состава не обеспечивает надежность и селективность процесса при изменяющемся составе сырья. При этом Eh (показатель электрохимического состояния среды) является перспективным параметром для включения в контуры автоматизированного и интеллектуального управления флотацией.

Влияние окислительно-восстановительного

потенциала (Eh) на селективность флотации и устойчивость процесса.

Окислительно-восстановительный потенциал (Eh) является интегральным показателем электрохимического состояния пульпы он отражает: влияние минералогического состава сырья, ионной среды, качества оборотной воды, реагентного режима.

При переработке медных руд с переменным составом Eh определяет:

- степень окисления поверхности сульфидных минералов;
- механизм адсорбции коллекторов, селективность флотационного процесса.

Колебания Eh в пульпе носят систематический характер, и они с изменением состава исходного сырья и условий его подготовки.

В ходе исследований установлено, что на стадии измельчения пульпа формируется в восста-

новительной или слабо восстановительной среде - это связано с образованием новых поверхностных сульфидных минералов. В основной флотации Eh смещается в сторону более окислительных значений за счёт аэрации и взаимодействия с реагентами.

Диапазон Eh, обеспечивающий максимальную селективность флотации меди, по данным полученным в ходе исследования, составляет от -50 до $+150$ мВ. В этом диапазоне достигается устойчивое извлечение меди при минимальном вовлечении пустой породы.

Получено по экспериментальным данным при низких значениях Eh (ниже -100 мВ) наблюдается нестабильность пенного слоя, снижение селективности флотации, в связи с недостаточной активацией поверхности минералов. Чрезмерное повышение Eh (выше $+200$ мВ) приводит к переокислению поверхности медных сульфидов, снижению эффективности адсорбции коллекторов, росту потерь меди в хвостах.

Подтверждено, что при стабильном поддержании Eh в оптимальном диапазоне удаётся сгладить влияние вариаций исходного сырья на технологические показатели.

При отсутствии оперативного контроля Eh на-

блюдаются резкие колебания извлечения меди, ухудшение качества концентрата, с повышением содержания вторичных окисленных минералов и ионов железа в пульпе.

По результатам исследования выявлено, что изменение окислительно-восстановительного потенциала пульпы оказывает решающее влияние на селективность флотации и устойчивость технологического процесса. При этом поддержание Eh в оптимальном диапазоне позволяет повысить извлечение меди, снизить чувствительность флотации к вариабельности исходного сырья.

На представленном рис.8 графике представлена зависимость извлечения меди от значения окислительно-восстановительного потенциала (Eh) пульпы в процессе флотационного обогащения. Кривая имеет выраженный экстремальный характер, свидетельствующий о наличии оптимального диапазона Eh, где достигаются наибольшие значения извлечения меди. Низкие значения Eh, соответствуют восстановительной среде, извлечение меди снижено, что связано с нестабильностью пенного слоя и недостаточной активацией поверхности сульфидных минералов, наблюдается ухудшение эффективности адсорбции коллекторов.

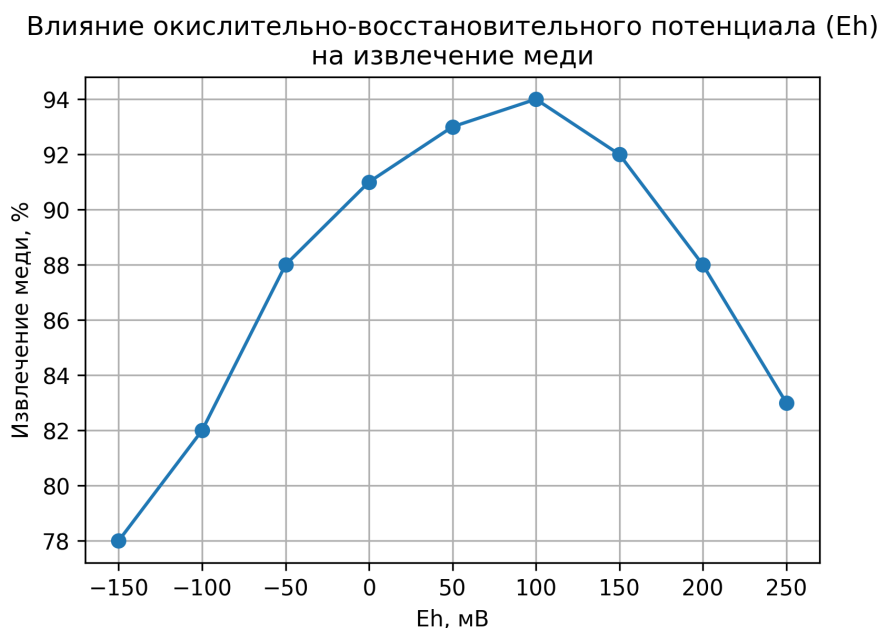


Рис.8 - Зависимость извлечения меди от окислительно-восстановительного потенциала (Eh)

Увеличение E_h создает рост извлечения меди, максимум в интервале от -50 до $+150$ мВ. В этом диапазоне формируются наиболее благоприятные электрохимические условия для селективной флотации медных минералов. Повышение E_h приводит к снижению извлечения, переокислению поверхности минералов, ухудшению гидрофобных свойств частиц и росту потерь меди в хвостах.

График на рис.9 показывает изменение устойчивости пенного слоя в зависимости от окислительно-восстановительного потенциала пульпы. Устойчивость пены оценивалась по от-

носительному индексу, сохранности структуры пенного слоя в процессе флотации.

Для низких показателей E_h наблюдается пониженная устойчивость пены, определяющаяся недостаточной гидрофобизацией частиц, слабой фиксацией пузырьков воздуха.

С повышением показателя E_h , устойчивость пенного слоя возрастает, достигает максимальных значений в диапазоне $0...+100$ мВ, оптимальные условия флотации. Эти условия составляют баланс между гидрофобностью частиц и прочностью межфазных пленок.

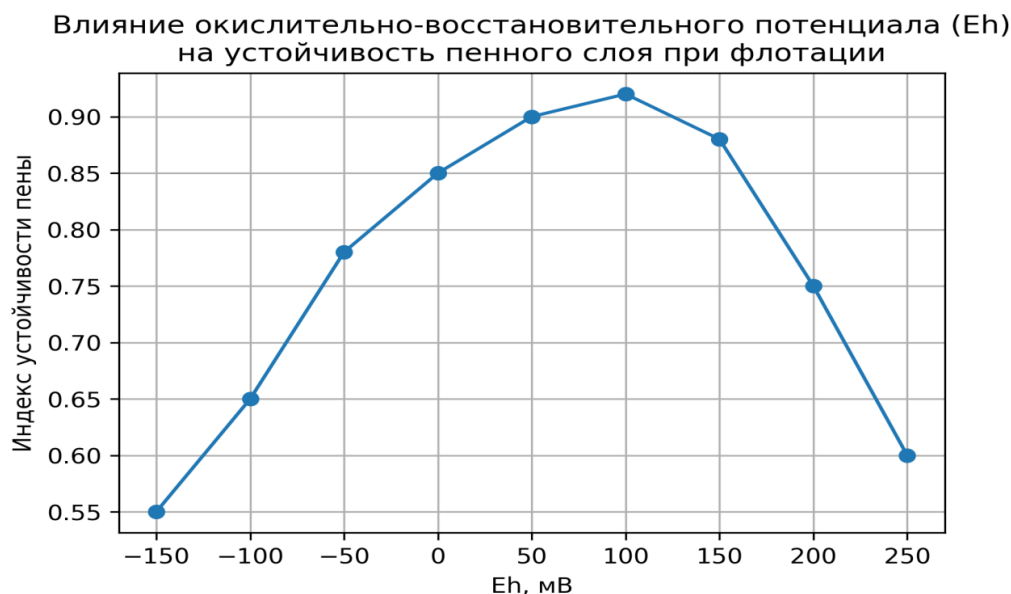


Рис.9 - Влияние окислительно-восстановительного потенциала (E_h) на устойчивость пенного слоя

При дальнейшем росте E_h устойчивость пены снижается, происходит изменение поверхностных свойств минералов, увеличивается гидрофильность. График демонстрирует, устойчивость пенного слоя, а также извлечение меди, зависит от электрохимического состояния пульпы.

Оценка взаимосвязи параметров химии пульпы и технологических показателей флотации.

Анализ лабораторных данных и результатов исследований показал, что технологические показатели флотации меди (извлечение, качество концентрата и устойчивость пенного

слоя) находятся в взаимосвязи с химическим состоянием пульпы, параметрами окислительно-восстановительного потенциала (E_h), pH и ионного состава жидкой фазы.

Определено, что извлечение меди имеет выраженную нелинейную зависимость от E_h . Максимальные значения извлечения достигаются при поддержании E_h в диапазоне $-50...+150$ мВ, при этом обеспечивается оптимальное условие адсорбции коллекторов, селективного закрепления медных сульфидов на пузырьках воздуха. Выход E_h за указанные пределы приводит к снижению извлечения из-за нестабильности пены (в восстановительной среде), или переокисле-

ния поверхности минералов (в окислительной среде).

Качество концентрата зависит от химии пульпы, повышенные концентрации ионов Ca^{2+} и SO_4^{2-} , характерные для оборотной воды, вызывают рост механического захвата пустой породы и снижению содержания меди в концентрате. Удержание стабильного pH в слабощелочной области (8,6–9,2) частично компенсирует негативное влияние ионной среды.

Стабильность пенного слоя показывает высокую чувствительность к Eh и ионному составу пульпы. Более стабильная пена формируется при Eh, стремящейся к нулевым положительным значениям, при крайних значениях потенциала возможно разрушение пенной структуры и рост технологических потерь.

Сравнение химических параметров пульпы с технологическими показателями подтверждает, что Eh является ключевым интегральным индикатором, определяющим текущее состояние процесса флотации. В условиях переменного состава исходного сырья контроль Eh и ионной среды, обеспечивает устойчивость флотации и прогнозируемое качество концентрата.

Анализ возможности автоматизированного контроля параметров пульпы.

Результаты настоящего исследования подтверждают целесообразность применения автоматизированного контроля химических параметров пульпы в процессе флотационного обогащения. Применение электрохимических датчиков pH и окислительно-восстановительного потенциала (Eh), установленных в пульпу, предполагает оперативное получение данных в режиме реального времени. Это способствует выявлению отклонений химического состояния среды, которые недоступны при периодическом лабораторном контроле.

Автоматизация мониторинга параметров пульпы повышает устойчивость флотационного процесса за счёт сокращения времени отклика между изменением состава сырья и корректировкой технологических режимов. Стабильный и оперативный сбор данных формирует основу для применения аналитических и интеллектуальных методов обработки информации. Полученные результаты показывают, что автоматизированный контроль необходимый составляющая повышения эффективности, предсказуемости флотации в условиях переменного состава исходного сырья.

Обоснование применения аналитических и интеллектуальных методов для адаптивного управления флотацией.

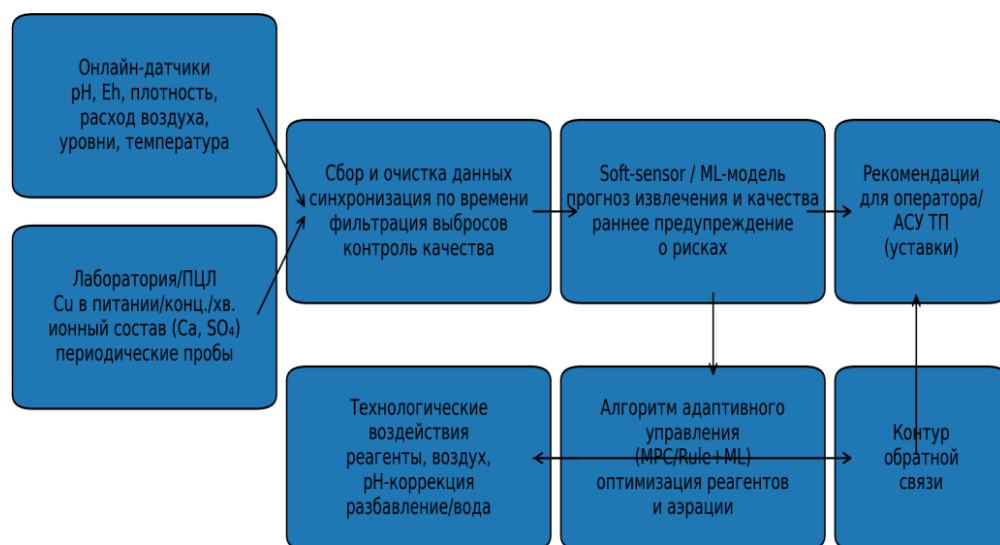


Рис.10 - Функциональная схема применения аналитических и интеллектуальных методов для управления флотацией

Результаты исследования показывают, что химическое состояние пульпы (рН, Eh, ионный состав, минерализация оборотной воды) изменяется во времени и по стадиям, а технологические показатели флотации (извлечение Cu, качество концентрата, устойчивость пены) реагируют на эти изменения нелинейно и с временным лагом. В этих условиях операторы «по факту» не успевают корректировать режимы (реагенты, воздух, рН-коррекция), увеличиваются потери Cu, ухудшается стабильность процесса. Целесообразно переходить к data-driven подходу: непрерывный сбор данных → аналитика → прогноз → рекомендация/уставка.

Функциональная схема применения аналитических и интеллектуальных методов для управления флотацией представлена на рис.10.

Схема на рис.10 показывает структуру аналитико-интеллектуальной системы адаптивного управления флотационным процессом на основе параметров химии пульпы.

Входной поток данных формируется онлайн-датчиками рН, окислительно-восстановительного потенциала (Eh), плотности пульпы и расхода воздуха, результатами анализов производственно-контрольной лаборатории по содержанию меди, ионному составу жидкой фазы.

На этапе сбора и предварительной обработки, данные синхронизируются, фильтруются и проверяются на достоверность и адекватность.

Аналитические и интеллектуальные модели (soft-сенсоры, регрессионные и машинного обучения) оценивают текущее состояние процесса и прогноз технологических показателей флотации. По полученному прогнозу формируются рекомендации по корректировке реагентного режима, аэрации и рН, которые реализуются через контуры АСУ-ТП.

Обратная связь обеспечивает адаптацию системы к изменяющемуся химическому составу пульпы, повышает устойчивость, эффективность флотации.

Табл.4 предназначена для систематизации параметров химического и технологического состояния пульпы, для аналитической обработки данных в интеллектуальных моделях адаптивного управления флотационным процессом. Указанные применяются в корреляционном и прогнозном анализе для оценки взаимосвязи между химией пульпы и технологическими показателями флотации (извлечение меди, качество концентрата, устойчивость пенного слоя), при формировании рекомендаций по корректировке реагентного режима, аэрации и параметров процесса в условиях изменяющегося химического состава пульпы.

Таблица 4 - Использование параметров химии пульпы в аналитических и интеллектуальных моделях управления флотацией

Наблюдаемые параметры (по отчёту)	Аналитическая обработка	Выход модели	Управляющее воздействие (рекомендация)
рН, Eh (онлайн)	фильтрация выбросов, тренды	риск переокисления/недоокисления	корректировка воздуха/реагентов, стабилизация режима
Ca^{2+} , SO_4^{2-} (лаборат.)	контроль ионной силы	риск падения селективности	разбавление/водообмен, корректировка реагентов
Cu в питании/конц./хв.	расчёт KPI, лаг-анализ	прогноз извлечения/качества	адаптивная оптимизация уставок

Матрица рис.11, показывает степень влияния параметров химии пульпы на основные технологические показатели флотации меди. Коэффициенты характеризуют направление и относительную силу связи между химическими параметрами (рН, Eh, концентрации ионов Ca^{2+} и SO_4^{2-} , плотность пульпы, расход воздуха), а также показатели процесса (извлечение меди, содержание меди в концентрате, устойчивость пенного слоя).

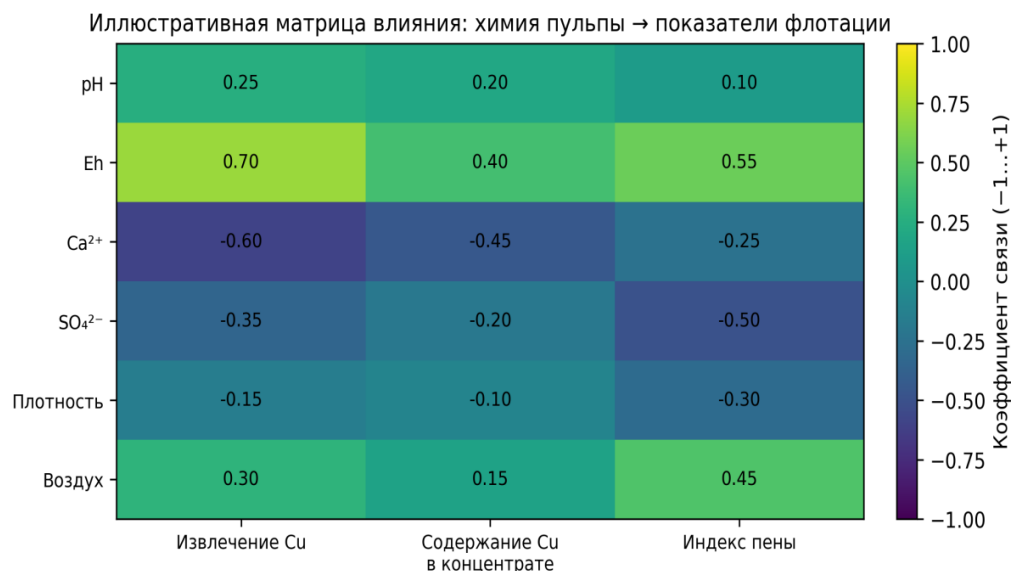


Рис.11 - Матрица взаимосвязи параметров химии пульпы и технологических показателей флотации

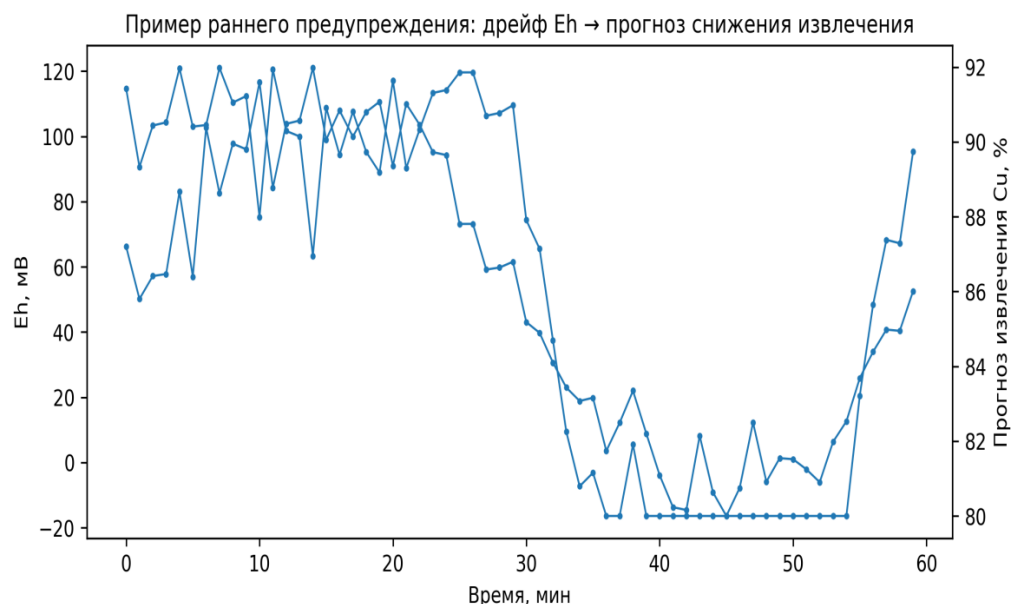


Рис.12 - Прогноз изменения извлечения меди в зависимости от окислительно-восстановительного потенциала (Eh) во времени

Положительная связь установлена между окислительно-восстановительным потенциалом (Eh) и извлечением меди, устойчивостью пенного слоя — это подтверждает ключевую роль электрохимического состояния среды. Отрицательные коэффициенты для ионов кальция

и сульфатов указывают их негативное влияние на селективность флотации, качество концентрата. Матрица позволяет выбрать приоритетные входные признаки аналитических и интеллектуальных моделей, формировать рекомендации по адаптивному управлению флотационным процессом.

На графике рис.12 представлена динамика окислительно-восстановительного потенциала (Eh) пульпы во времени и соответствующий прогноз изменения извлечения меди, полученный с использованием аналитико-интеллектуальной модели. Показано, что колебания Eh носят квазипериодический характер и отражают изменение химического состояния пульпы при переменном составе исходного сырья. По мере отклонения Eh от оптимального диапазона наблюдается прогнозируемое снижение извлечения меди – это свидетельствует о высокой чувствительности флотационного процесса к электрохимическому состоянию среды.

Прогноз идет с опережением по времени относительно фактического ухудшения технологических показателей, что делает возможным использование его в качестве механизма раннего предупреждения. График показывает возможность раннего выявления неблагоприятных режимов флотации, обосновывает применение интеллектуальных методов обработки данных для адаптивного управления процессом в режиме реального времени.

Научная новизна исследования заключается в обосновании роли окислительно-восстановительного потенциала пульпы как ключевого интегрального параметра, определяющего селективность, устойчивость флотационного обогащения меди в условиях переменного химического состава сырья. Представлена возможность использования онлайн-измерений pH и Eh в комплексе с лабораторными данными по ионному составу при построении аналитико-интеллектуальных моделей, обеспечивающих прогноз технологических показателей флотации с предупреждением по времени. Подготовлен и предложен подход к адаптивному управлению флотационным процессом, на предиктив-

ной оценке риска снижения извлечения меди, формирования упреждающих управляющих воздействий. Полученные результаты расширяют представления о применении методов интеллектуального анализа данных с целью повышения эффективности и надежности процессов флотационного обогащения.

Дальнейшие исследования направлены на развитие предиктивных алгоритмов регулирования технологических параметров, основанных на использовании временных рядов и машинного обучения для упреждающего выявления отклонений процесса, созданию и валидации soft-сенсоров для оценки технологических показателей в реальном времени, разработке адаптивных стратегий управления реагентным режимом и аэрацией при переменном составе исходного сырья, масштабирование предложенных решений для предприятий ГМК Республики Казахстан.

Выводы.

1) Выполнен анализ химического состава пульпы, для различных стадий флотационного обогащения. Установлено, что ключевыми параметрами, влияющими на извлечение меди, являются окислительно-восстановительный потенциал (Eh), pH, концентрации ионов кальция и сульфатов. pH 8,2–9,4, Eh –150...+250 мВ, концентрации Ca^{2+} до 480 мг/л и SO_4^{2-} до 1500 мг/л. Показано, химическое состояние пульпы изменяется во времени, чувствительно к изменению состава исходного сырья, оборотной воды.

2) Исследовано влияние изменения окислительно-восстановительного потенциала на селективность флотации и устойчивость процесса. Установлен оптимальный диапазон Eh, при котором обеспечивается максимальное извлечение меди и стабильность пенного слоя. Выход Eh за пределы данного диапазона приводит к снижению эффективности флотации Eh –50...+150 мВ, при выходе за который извлечение меди снижается на 5–12 %

3) Оценена взаимосвязь между параметрами химии пульпы и технологическими показателя-

ми флотации. Показано, что E_h является наиболее информативным интегральным параметром, определяющим извлечение меди, качество концентрата и устойчивость процесса, тогда как pH и ионный состав оказывают преимущественно косвенное влияние.

4) Проанализированы возможности автоматизированного онлайн-контроля параметров пульпы. Доказана эффективность применения электрохимических датчиков pH и E_h для оперативного мониторинга химического состояния среды по сравнению с лабораторным контролем.

5) Обосновано применение аналитических и интеллектуальных методов обработки данных при формировании прогнозов и рекомендаций по адаптивному управлению флотацией. Показа-

на возможность упреждающего выявления рисков снижения извлечения меди при изменении химии пульпы.

6) Определены направления дальнейших исследований, связанные с интеграцией онлайн-контроля химии пульпы, развитием предиктивных алгоритмов регулирования технологических параметров и внедрением адаптивных стратегий управления в контуры АСУ-ТП флотации.

Финансирование. Статья подготовлена по результатам исследований в рамках ПЦФ BR28713037 «Разработка программно-аппаратного комплекса на базе технологий искусственного интеллекта для управления процессом флотации на горно-обогатительных предприятиях».

Литература

1. Отчет о научно-исследовательской работе «Разработка программно-аппаратного комплекса на базе технологий искусственного интеллекта для управления процессом флотации на горно-обогатительных предприятиях», г. Астана, 2025.
2. Quintanilla P., Neethling S.J., Navia D., Brito-Parada P.R. A dynamic flotation model for predictive control incorporating froth physics. Part I: Model development/Minerals Engineering. -2021. -Vol.173:107192. DOI 10.1016/j.mineng.2021.107192.
3. Corin K.C., Charamba A., Manono M.S. Water quality impact on flotation response: A focus on specific ions and temperature/Minerals Engineering. -2024. -Vol.207:108549. DOI 10.1016/j.mineng.2023.108549.
4. Bahrami A., Hassanpour Kashani R., Kazemi F., Ghorbani Y. Oxidation-reduction effects in the flotation of copper sulfide minerals and molybdenite – A proof of concept at industrial scale//Minerals Engineering. -2022. -Vol.180:107505. DOI 10.1016/j.mineng.2022.107505.
5. Panayotova M. Control of Non-Ferrous Metal-Sulfide Minerals' Flotation via Pulp Potential// Minerals. -2023. –Vol.13(12):1512. DOI 10.3390/min13121512.
6. Rankin P., Di Feo A., Kelebek S. Ionic strength of flotation medium and consequential effects/ Minerals Engineering. -2025. -Vol.220:109048. DOI 10.1016/j.mineng.2024.109048.
7. Wei B., Mao Y., Wang L., Shen P., Wang H., Liu D. Sources, Performance and Mechanisms of Metal Ions in the Flotation Process of Copper, Lead, and Zinc Ores: A Review// Minerals. -2024.-Vol.14(11):1105. DOI 10.3390/min14111105.
8. Castellón C.I., Toro N., Gálvez E., Robles P., Leiva W.H., Jeldres R.I. Froth Flotation of Chalcopyrite/Pyrite Ore: A Critical Review// Materials. -2022. -Vol.15(19):6536. DOI 10.3390/ma15196536.
9. Soufiabadi A.M., Nejadaria M., Dehghan R., Safari M., Hassanzadeh A., Khoshdast H. Effect of different process water sources on rougher flotation efficiency of a copper ore: A case study at Sarcheshmeh Copper Complex (Iran)// Physicochemical Problems of Mineral Processing. -2023. -Vol.59(5):184087. DOI 10.37190/ppmp/184087.

10. Oosthuizen D.J., le Roux J.D., Craig I.K. Non-linear Model Predictive Control to Improve the Mineralogical Efficiency of Flotation Circuits/ IFAC-PapersOnLine. -2024. -Vol.58(22). -P.1-6 DOI 10.1016/j.ifacol.2024.09.281.
11. Semushkina L.V., Tussupbayev N.K., Turysbekov D.K., Narbekova S.M., Kaldybayeva Zh.A. Flotation processing of copper-containing technogenic raw materials using a composite flotation reagent// Complex Use of Mineral Resources. -2023. -Vol.324(1). -P.34–42. DOI10.31643/2023/6445.05.
12. Manono M.S., Corin K.C. Considering Specific Ion Effects on Froth Stability in Sulfidic Cu–Ni–PGM Ore Flotation// Minerals. -2022. -Vol.12(3):321. DOI 10.3390/min12030321.

Reference

1. Otchet o nauchno-issledovatel' skoj rabote «Razrabotka programmno-apparatnogo kompleksa na baze tehnologij iskusstvennogo intellekta dlja upravlenija processom flotacii na gorno-obogatitel' nyh predpriyatijah», Astana. -2025. [in Russian]
2. Quintanilla P., Neethling S.J., Navia D., Brito-Parada P.R. A dynamic flotation model for predictive control incorporating froth physics. Part I: Model development/Minerals Engineering. -2021. -Vol.173:107192. DOI 10.1016/j.mineng.2021.107192.
3. Corin K.C., Charamba A., Manono M.S. Water quality impact on flotation response: A focus on specific ions and temperature/Minerals Engineering. -2024. -Vol.207:108549. DOI 10.1016/j.mineng.2023.108549.
4. Bahrami A., Hassanpour Kashani R., Kazemi F., Ghorbani Y. Oxidation-reduction effects in the flotation of copper sulfide minerals and molybdenite – A proof of concept at industrial scale//Minerals Engineering. -2022. -Vol.180:107505. DOI 10.1016/j.mineng.2022.107505.
5. Panayotova M. Control of Non-Ferrous Metal-Sulfide Minerals' Flotation via Pulp Potential// Minerals. -2023. -Vol.13(12):1512. DOI 10.3390/min13121512.
6. Rankin P., Di Feo A., Kelebek S. Ionic strength of flotation medium and consequential effects/ Minerals Engineering. -2025. -Vol.220:109048. DOI 10.1016/j.mineng.2024.109048.
7. Wei B., Mao Y., Wang L., Shen P., Wang H., Liu D. Sources, Performance and Mechanisms of Metal Ions in the Flotation Process of Copper, Lead, and Zinc Ores: A Review// Minerals. -2024.- Vol.14(11):1105. DOI 10.3390/min14111105.
8. Castellón C.I., Toro N., Gálvez E., Robles P., Leiva W.H., Jeldres R.I. Froth Flotation of Chalcopyrite/Pyrite Ore: A Critical Review// Materials. -2022. -Vol.15(19):6536. DOI 10.3390/ma15196536.
9. Soufiabadi A.M., Nejadaria M., Dehghan R., Safari M., Hassanzadeh A., Khoshdast H. Effect of different process water sources on rougher flotation efficiency of a copper ore: A case study at Sarcheshmeh Copper Complex (Iran)// Physicochemical Problems of Mineral Processing. -2023. - Vol.59(5):184087. DOI: 10.37190/ppmp/184087.
10. Oosthuizen D.J., le Roux J.D., Craig I.K. Non-linear Model Predictive Control to Improve the Mineralogical Efficiency of Flotation Circuits// IFAC-PapersOnLine. -2024. -Vol.58(22). -P.1-6 DOI 10.1016/j.ifacol.2024.09.281.
11. Semushkina L.V., Tussupbayev N.K., Turysbekov D.K., Narbekova S.M., Kaldybayeva Zh.A. Flotation processing of copper-containing technogenic raw materials using a composite flotation reagent// Complex Use of Mineral Resources. -2023. -Vol.324(1). -P.34–42. DOI10.31643/2023/6445.05.

12. Manono M.S., Corin K.C. Considering Specific Ion Effects on Froth Stability in Sulfidic Cu–Ni–PGM Ore Flotation// Minerals. -2022. -Vol.12(3):321. DOI 10.3390/min12030321.

Сведения об авторах

Акишев К. М. - к.т.н., ассоциированный профессор, Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Астана, Казахстан, e-mail: akmail04cx@mail.ru;

Подвалов А.Ю.- к.г.н, ТОО «AG TECH», Астана, Казахстан, e-mail: a.podvalov@ag-tech.kz;

Зейнуллин А.А.- д.т.н., профессор, Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Астана, Казахстан, e-mail: karim_57@mail.ru;

Айбульдинов Е.К.- PhD, профессор, Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Астана, Казахстан, e-mail: elaman_@mail.ru;

Нурмаганбетов А.С.- к.т.н.), ассоциированный профессор, ТОО «AG TECH», Астана, Казахстан, a.nurmaganbetov@ag-tech.kz;

Оспанова М. К.- к.ф.м.н., Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Астана, Казахстан, e-mail: ospanova_madi_59@mail.ru;

Чугай М.А.- бакалавр, ТОО «AG TECH», Астана, Казахстан, e-mail: m.chagay@ag-tech.kz;

Айтиева М. И. -бакалавр, ТОО «AG Tech», Астана, Казахстан, m.aitiyeva@ag-tech.kz;

Хусаинова С. М.- магистр технических наук, ТОО «AG TECH», Астана, Казахстан, e-mail: s.khussainova@ag-tech.kz;

Токтар Н.А.- докторант, Торайгыров университет, Павлодар, Казахстан, e-mail: akanov44@yandex.ru.

Information about the authors

Akishev K. M. - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor (Associate Professor), K.Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: akmail04cx@mail.ru;

Podvalov A.- Candidate of Geographical Sciences, AG TECH LLP, Astana, Kazakhstan, e-mail: a.podvalov@ag-tech.kz;

Zeynullin A.A.- Doctor of Technical Sciences, Professor, K.Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: karim_57@mail.ru;

Aibuldinov Y.- PhD, Professor, K.Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: elaman_@mail.ru;

Nurmaganbetov A.- Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, AG TECH LLP, Astana, Kazakhstan, e-mail: a.nurmaganbetov@ag-tech.kz;

Ospanova M.K.- Candidate of Physical and Mathematical Sciences, K.Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: ospanova_madi_59@mail.ru;

Chagay M.- Bachelor's degree, AG TECH LLP, Astana, Kazakhstan, e-mail: m.chagay@ag-tech.kz;

Aitiyeva M.- Bachelor's degree, AG TECH LLP, Astana, Kazakhstan, e-mail: m.aitiyeva@ag-tech.kz;

Khussainova S.- Master of Science in Engineering, Astana, Kazakhstan, e-mail: s.khussainova@ag-tech.kz

Toktar N.- doctoral student, Toraigyrov University, Pavlodar, Kazakhstan, e-mail: akanov44@yandex.ru.